

Einfluß des winterlichen stratosphärischen Polarwirbels auf die zonale Symmetrie des Windfeldes in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre simuliert mit dem COMMA-Modell

M. Lange, Ch. Jacobi

Zusammenfassung

Langzeitmessungen des Windfeldes in der Mesopausenregion ($\sim 92\text{ km}$) an verschiedenen Stationen in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre zeigen systematische zonale Variationen beim (zeitlich) gemittelten Zonal- und Meridionalwind und bei den Amplituden und Phasen der halbtägigen Gezeiten. Als eines der herausragenden Muster, die zonale Variationen in der unteren mittleren Atmosphäre anregen, wird der Einfluß der Geopotentialstörungen zur zonalen Wellenzahl 1 und 2, die mit dem winterlichen stratosphärischen Polarwirbel verbunden sind, auf das Windfeld in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre numerisch mit dem COMMA-Modell der mittleren Atmosphäre untersucht. Die Modellergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der zonalen Variationen des mittleren Zonalwindes, die im Breitenbereich 52°N bis 56°N beobachtet werden und in der Größenordnung von $10 - 20\text{ m/s}$ liegen. Auch die halbtägigen Gezeitenamplituden und -phasen zeigen qualitative und quantitative Übereinstimmungen zwischen Beobachtungen und Modellergebnissen.

Abstract

Long-term time series of wind field observations in the upper mesosphere / lower thermosphere region at different locations in the midlatitude region indicate longitudinal variability in the (time-) mean zonal and meridional wind and in the amplitudes and phases of the semidiurnal tide, too. Being one of the prominent patterns forcing zonal inhomogeneities in the lower middle atmosphere, the influence of the zonal wavenumber 1 and wavenumber 2 disturbances connected with the winter Northern Hemisphere stratospheric polar vortex on the mesosphere- / lower thermosphere wind field is numerically investigated with the COMMA model. The model results show that the zonal variations through the stationary waves coincide with typical observed mean zonal wind differences between different stations along the midlatitude belt between 52°N and 56°N with values about $10 - 20\text{ m/s}$. Also, the amplitude and phase variations of the semidiurnal tide show qualitative and quantitative agreements between model results and observations.

1. Einleitung

In numerischen Untersuchungen werden Trends und Wellenausbreitung in der mittleren Atmosphäre häufig durch die zonal gemittelten Felder beschrieben. Langzeitbeobachtungen des Windfeldes in der Mesopausenregion in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre

zeigen neben zeitlich und örtlich periodischen Schwankungen durch Gezeiten und planetare Wellen auch systematische längenabhängige Variationen des mittleren Zonalwindes und der Amplitudenverteilung der halbtägigen Gezeiten (Bremer et al., 1997; Jacobi et al., 1999). Als Ursache dafür kommen in erster Linie orografisch bedingte Einflüsse in Frage, die einerseits zu einer ausgeprägten Abweichung des winterlichen Polarwirbels von der Radialsymmetrie um den Pol führen, aber auch zu einer Längenabhängigkeit der Schwerewellenaktivität. Auch Unterschiede in der Land-Meer Verteilung beeinflussen die Schwerewellenaktivität. Weiterhin können direkte Variationen des solaren Antriebs für die halbtägige Gezeitenamplitude durch längenabhängige Ozonvariationen von Bedeutung sein.

Bei dem Vergleich von Langzeitmessungen des halbtägigen solaren Gezeitenwindes in 92 km Höhe an 6 verschiedenen Stationen von Jacobi et. al (1999) (Abb. 1, Tab. 1) wird im Winter eine besonders starke Variation der Amplitude zwischen ca. 8 m/s und 25 m/s und der Phase um ca. 2 Stunden beobachtet. Die Differenz der Amplitude wird mit zunehmendem Abstand zwischen den Stationen größer, was für eine Wechselwirkung der solaren Gezeiten mit einer großskaligen nichtwandernden Wellenstörung spricht. Lediglich die am weitesten entfernte Station (Kazan) weicht davon ab mit der zu Saskatoon vergleichbaren Amplitudenstärke. Auch zeigen Vergleiche zwischen Collm und Saskatoon eine Korrelation der Differenzen der halbtägigen Gezeitenamplitude des Zonalwindes an beiden Stationen mit der Tiefe des winterlichen Polarwirbels (Jacobi, 2000). Damit liegt

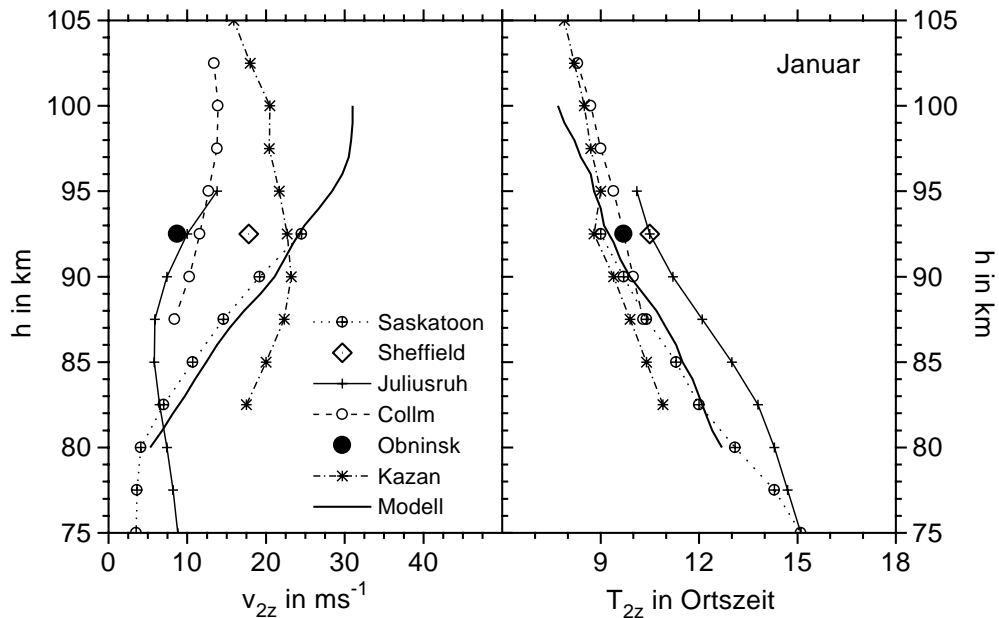


Abbildung 1: Profile der Langzeitmittel der halbtägigen Gezeitenamplitude (links) und Phase (rechts) für Januar an den verschiedenen Meßstationen in Tab. 1 zwischen 52°N und 56°N (nach Jacobi et al., 1999).

Meßstation	Koordinaten
Saskatoon	$52^\circ N, 107^\circ W$
Sheffield	$53^\circ N, 4^\circ W$
Juliusruh	$55^\circ N, 13^\circ E$
Collm	$52^\circ N, 15^\circ E$
Obninsk	$55^\circ N, 37^\circ E$
Kazan	$56^\circ N, 49^\circ E$

Tabelle 1: Koordinaten der Meßstationen im Breitenbereich $52 - 56^\circ N$.

die Vermutung nahe, daß die beobachteten längenabhängigen Variationen im wesentlichen auf den Einfluß der stationären Wellen, verbunden mit dem winterlichen Polarwirbel in der Stratosphäre, zurückzuführen sind.

2. Stationäre Wellenanregung

Zur Untersuchung des Einflusses des winterlichen Polarwirbels auf das Windfeld in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre werden Modellversuche mit einer stationären Wellenanregung durchgeführt. Realisiert wird dies im Modell durch Vorgabe einer Geopotentialstörung am unteren Rand, die zur Vermeidung von numerischen Instabilitäten, gleich einem allmählich wachsenden Gebirge, nach einer Einschwingphase von 40 Tagen eingeschaltet wird.

Die Gleichung für die Störung lautet:

$$\Phi = \tilde{\Phi}(\lambda, \phi) [1 - \exp(-t/\tau)],$$

mit
$$\tilde{\Phi}(\lambda, \phi) = f1(\lambda) \cdot g1(\phi) + f2(\lambda) \cdot g2(\phi),$$

wobei die Gesamtstörung durch ihre Geopotentialanteile zur zonalen Wellenzahl 1 und 2 approximiert wird und f und g die Längen- und Breitenabhängigkeit der Welle 1 und Welle 2-Anteile angeben. Die Längenabhängigkeit wird durch Kosinusfunktionen mit einer zusätzlichen Phase dargestellt, die Breitenabhängigkeit wird im Bereich $0 < \phi \leq 77.5^\circ N$ durch eine Gaussfunktion approximiert, nördlich davon zum Pol hin durch einen linearen Abfall auf Null:

$$\begin{aligned} f1(\lambda) &= \hat{\Phi}_1 \cos(\lambda + \delta\lambda_1), \\ f2(\lambda) &= \hat{\Phi}_2 \cos(\lambda + \delta\lambda_2), \end{aligned}$$

$$g1(\phi) = \begin{cases} \exp(-2((\phi - \delta\phi_1)/\alpha)^2) & : 0 < \phi \leq 77.5^\circ N \\ (90 - \phi)/(90 - 77.5) \cdot g1(77.5^\circ N) & : 77.5 < \phi < 90^\circ N, \end{cases}$$

$$g2(\phi) = \begin{cases} \exp(-2((\phi - \delta\phi_2)/\beta)^2) & : 0 < \phi \leq 77.5^\circ N \\ (90 - \phi)/(90 - 77.5) \cdot g2(77.5^\circ N) & : 77.5 < \phi < 90^\circ N, \end{cases}$$

λ, ϕ : geographische Länge, geographische Breite,
 $\hat{\Phi}_1$: Amplitude der stationären Welle 1 am unteren Rand,
 $\hat{\Phi}_2$: Amplitude der stationären Welle 2 am unteren Rand,
 $\delta\lambda_1$: Phasenlage der stationären Welle 1 am unteren Rand,
 $\delta\lambda_2$: Phasenlage der stationären Welle 2 am unteren Rand,
 $\delta\phi_1$: Phasenlage der stationären Welle 1 am unteren Rand,
 $\delta\phi_2$: Phasenlage der stationären Welle 2 am unteren Rand,
 α, β : Parameter zur Anpassung der Gauss-Funktion.

Die Zeitkonstante τ beträgt einen Tag. Die Modellläufe umfassen einen Zeitraum von weiteren 40 Tagen, so daß sich die Störung am 80. Modelltag voll im Modellgebiet entwickelt hat. Die Phasenlagen und Amplituden der Welle 1 und Welle 2-Anteile der Geopotentialstörung sowie die Parameter der Gaussfunktion sind so gewählt, daß die stationäre Welle in 30 hPa, die Ergebnisse aus Langzeitbeobachtungen möglichst gut approximiert. Daraus ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 \hat{\Phi}_1 &= 300 \text{ gpm} \\
 \hat{\Phi}_2 &= 260 \text{ gpm} \\
 \delta\lambda_1 &= +22^\circ E; \quad \delta\phi_1 = 55^\circ N \\
 \delta\lambda_2 &= +125^\circ E; \quad \delta\phi_2 = 60^\circ N \\
 \alpha &= 28.8 \\
 \beta &= 25.5
 \end{aligned}$$

Abb. 2 zeigt die Amplitude und Phase der stationären Geopotentialstörungen zur zonalen Wellenzahl 1 und 2 der Berliner 30 hPa Analysen für Januar in den Jahren 1979 - 1999, sowie die Geopotentialstörung im nächstgelegenen Höhenniveau im COMMA-Modell in 25.8 km, das ca. 25 hPa entspricht. Die Meridionalstruktur der Welle 1 und Welle 2 im Modell stimmt gut mit den Meßwerten überein.

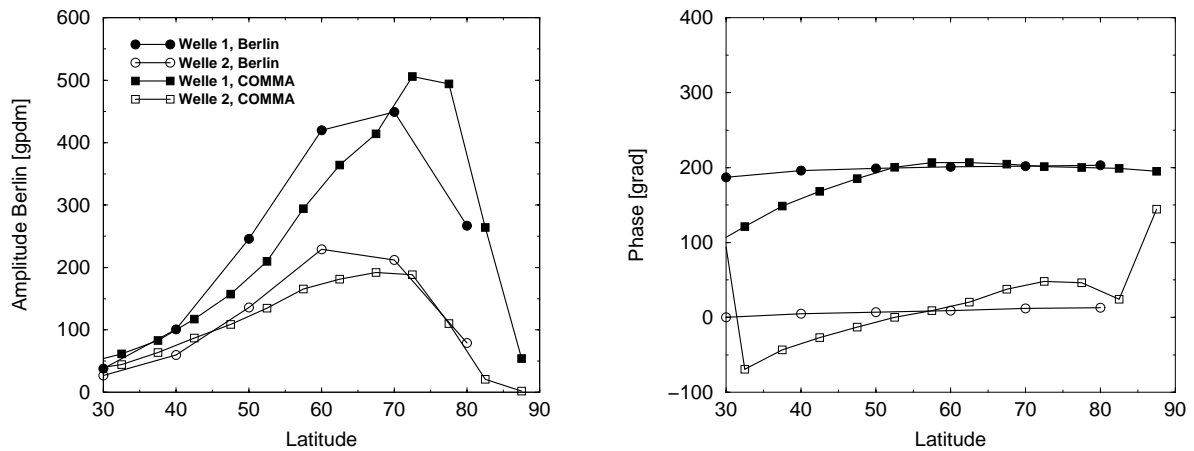


Abbildung 2: Amplitude und Phase der stationären Welle 1 und Welle 2 bestimmt aus 30 hPa Druckflächenhöhen von Berliner Analysen für das Januarmittel im Zeitraum 1979-1999 und stationäre Wellenanteile im Modellauf.

Die Phase der Modellanregung ist so gewählt, daß sie in $50 - 60^\circ N$ mit den Messungen übereinstimmt. Zu niederen Breiten hin wandert die Phase im Modell retrograd, wobei der Einfluß aufgrund der abnehmenden Amplitude jedoch gering ist. Auch die Abweichung der Phase der Welle 2 am Pol ist dort wegen der geringen Amplitude vernachlässigbar. Damit werden in den mittleren Breiten möglichst realistische Bedingungen für die Modellsimulation geschaffen.

3. Modellergebnisse

Abb. 3 zeigt die Modellergebnisse für die stationäre Geopotentialstörung der zonalen Wellenzahl 1 und 2 vor dem Hintergrund des Zonalwindes. Das zonale Windfeld bei Winterbedingungen in der Nordhemisphäre ist charakterisiert durch den stratosphärischen / mesosphärischen Westwindjet in der Winterhemisphäre und dem Ostwindjet in der südlichen Sommerhemisphäre mit den darüberliegenden entgegengerichteten Jets in der unteren Thermosphäre. Es wird eine Zunahme der Geopotentialstörungen im Bereich des Mesosphärenjets beobachtet. Der Welle 1-Anteil erreicht dabei, trotz vergleichbarer Amplitudenstärke in der Anregung, deutlich höhere Werte als der Welle 2-Anteil. Oberhalb des Maximums des Mesosphärenjets wird die stationäre Welle stark gedämpft. Im Bereich der Windumkehr in ca. 90 km Höhe hat die Welle ein Minimum. Oberhalb der Mesopause nimmt die Amplitude der Welle wieder zu. Sie breitet sich auch in den Bereich des Westwindjets in die Südhemisphäre aus und verstärkt sich dort. Die Nullwindlinie stellt also keine strenge kritische Linie für stationäre Wellen im klassischen Sinne dar, die die Wellenausbreitung vollständig blockiert.

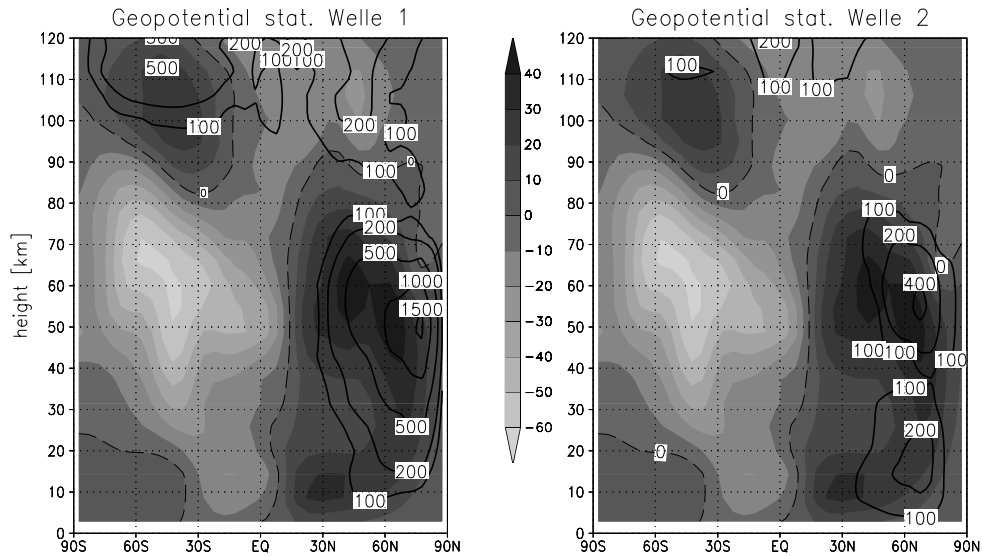


Abbildung 3: Geopotential der stationären Welle 1 und Welle 2 als Konturplot in gpm vor dem mittleren Zonalwind bei Januarbedingungen. Die Windgeschwindigkeiten sind schattiert dargestellt mit der gestrichelten Nullwindlinie. Das Konturintervall für den Zonalwind ist im Mittelbalken in m/s angegeben, mit positiven Werten für Westwind.

Das Ausbreitungsverhalten der Welle von der mesosphärischen Westwindzone in der Nordhemisphäre in die Westwindbereiche der Südhemisphäre in der unteren Thermosphäre ist bislang nicht geklärt. Das häufig beobachtete Verhalten für Rossby-Wellen, die sich entlang der Nullwindlinie, die als Wellenleiter fungiert, über den Äquator hinweg in die andere Hemisphäre ausbreiten ist hier wegen den trennenden Ostwinden nicht möglich. Mögliche Ursachen können in den Abweichungen von den klassischen Bedingungen liegen, wie beispielsweise dem Einfluß der Einschwingphase des Systems auf die Störung, oder Dämpfungsprozesse, die im Modell enthalten sind. Auch der Bereich der nichtlinearen Wechselwirkungen mit solaren Gezeiten, oder die Modulation von Schwerewellen, sind

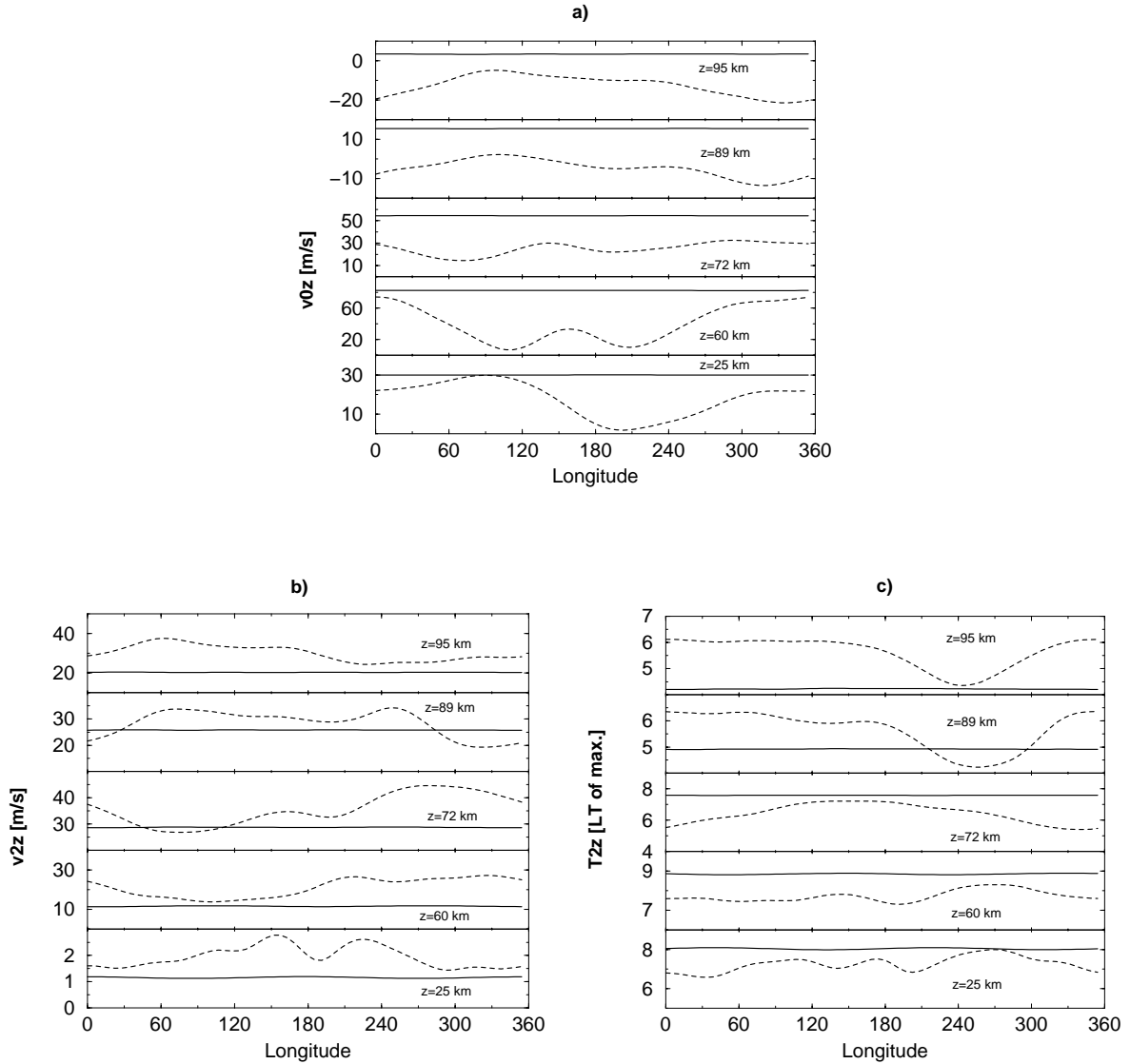


Abbildung 4: Längenabhängigkeit des mittleren Zonalwindes, sowie der Amplitude (b) und Phase (c) des halbtägigen Gezeitenwindes in $52.5^\circ N$ im Kontrolllauf (dicke durchgezogene Linie) und mit Anregung der stationären Welle (gestrichelt). Die Phase ist in der Lokalzeit des Maximums angegeben.

hier noch weiter zu untersuchen. Die Ausbreitung der Welle in die mesosphärischen Ostwinde der Südhemisphäre ist dagegen vollständig blockiert.

Den Einfluß der stationären Welle auf die Längenabhängigkeit des Zonalwindes und der halbtägigen Gezeiten des Zonalwindes in $52.5^\circ N$ zeigt Abb. 4. Der Zonalwind (a) zeigt durch die Wellenstörung im Gegensatz zu dem Kontrolllauf, eine sehr ausgeprägte Längenabhängigkeit mit Variationen von über 20 m/s in 25 km Höhe, knapp 80 m/s im Bereich des Mesosphärenjets in 60 km Höhe und $10 - 20\text{ m/s}$ im Mesopausenbereich. Auch der Mittelwert der Zonalgeschwindigkeit ändert sich in allen Höhen, mit einer starken Abnahme in der Mesosphäre und einer Verstärkung oberhalb der Windumkehr in der Mesopause.

Die halbtägige Gezeitenamplitude (b) zeigt im Modellauf mit Wellenstörung gegenüber dem Kontrolllauf, der wie bei der Zonalgeschwindigkeit eine rein zonalsymmetrische Verteilung aufweist, in allen Höhen oberhalb der Stratosphäre längenabhängige Variationen zwischen 10 und 20 m/s . Darüberhinaus wird in nahezu allen Höhen eine deutliche Verstärkung des Zonalmittels der Amplitude durch die Wellenstörung beobachtet. Auch die Phase (c) zeigt starke längenabhängige Variationen. Diese liegen in der Mesosphäre bei $1 - 1.5$ Stunden mit einer Verschiebung des Mittelwertes um ca. 1 Stunde zu früheren Zeiten. In der Mesopause liegen die Phasenvariationen bei $1.5 - 2$ Stunden, wobei der zonale Mittelwert hier gegenüber dem Kontrolllauf um eine Stunde nacheilt.

4. Vergleich mit Messungen

Abb. 5 zeigt einen Vergleich der Modellergebnisse für den halbtägigen zonalen Gezeitenwind im Höhenbereich $89 - 95\text{ km}$ mit Langzeitbeobachtungen im Mesopausenbereich zwischen 52 und $56^\circ N$ in 92.5 km Höhe (Vgl. auch Abb. 1).

Die Absolutbeträge der Phase unterscheiden sich zwischen Modell und Messungen zwar deutlich, die Änderung durch die stationäre Welle in 92.5 km Höhe zeigt jedoch in beiden Fällen eine positive Phasenverschiebung um ca. 1.5 Stunden von Saskatoon zum Nullmeridian. Der Abfall der Phase, der weiter östlich liegenden Stationen wird in den Modellergebnissen allerdings nicht wiedergegeben. Die Variation der halbtägigen Gezeitenamplitude von $10 - 20\text{ m/s}$ in 89 km liegt in der Größenordnung der Messungen. Auch wird die zonale Verteilung mit der ca. 10 m/s stärkeren Amplitude in Saskatoon (Kanada) gegenüber der Station Sheffield richtig wiedergegeben. Die weitere Abnahme zu den östlich liegenden Stationen wird jedoch nicht erfaßt, wohingegen der Anstieg zur östlichsten Station Kazan bei $49^\circ E$ auch in der Simulation beobachtet wird.

Es zeigt sich, daß der langwellige Anteil der Variation in der Simulation relativ gut wiedergegeben wird, wohingegen die Variationen zwischen nahe beieinander liegenden Stationen nicht erfaßt werden. Dies ist bei den großskaligen Störungen der Welle 1 und Welle 2 auch zu erwarten. Die Variationen zwischen Stationen mit einem kurzen Abstand sind möglicherweise auf kleinskaligere Störungen wie z.B. auf die längenabhängige Schwerewellenaktivität zurückzuführen. Berücksichtigt man die Meßungenauigkeit der verschiedenen Stationen zwischen 0 und $40^\circ E$, die mit $5 - 7\text{ m/s}$ angegeben werden (Shepherd, 1996), so liegt die Modellvariation jedoch weitgehend im Bereich der Meßgenauigkeit. Auch bei Ver-

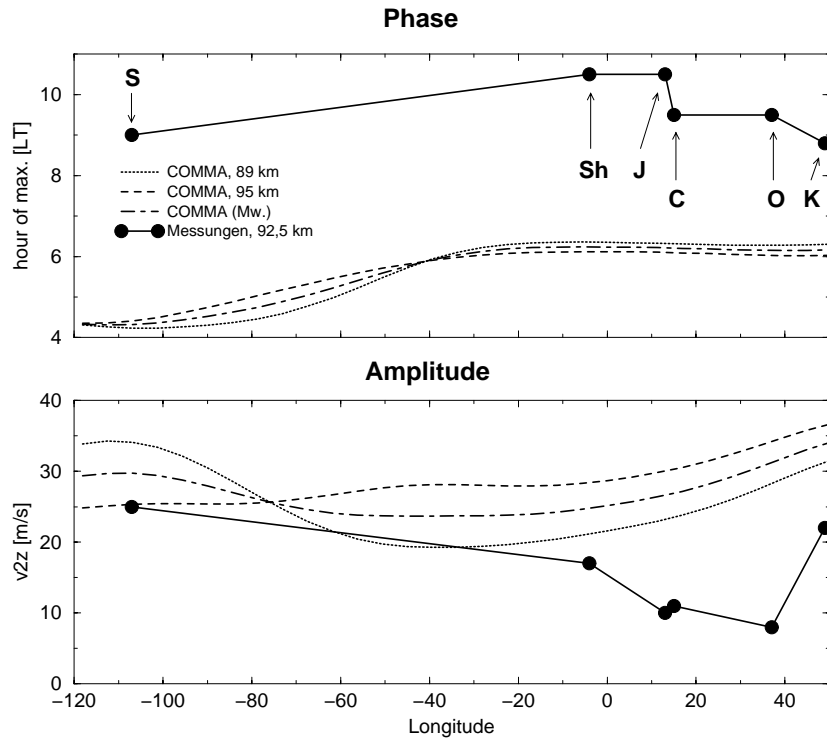


Abbildung 5: *Phase und Amplitude der halbtägigen Gezeiten des Zonalwindes in 92.5 km an den verschiedenen Meßstationen, sowie die Modellergebnisse für $z = 89$ km und 95 km und dem Mittelwert in $52.5^\circ N$ bei stationärer Wellenanregung. Die Abkürzungen geben die verschiedenen Meßstationen an. S: Saskatoon ($52^\circ N$, $107^\circ W$), Sh: Sheffield ($53^\circ N$, $4^\circ W$), J: Juliusruh ($55^\circ N$, $13^\circ E$), C: Collm ($52^\circ N$, $15^\circ E$), O: Obninsk ($55^\circ N$, $37^\circ E$), K: Kazan ($56^\circ N$, $49^\circ E$).*

gleichen der solaren Gezeiten zwischen Radarwindmessungen und dem Global Scale Wave Model (GSWM), das derzeit als "state of the art" bei der Simulation der Gezeiten in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre gilt, gelten Abweichungen in der Größenordnung noch als "good" (Manson et al., 1999; Hagan et al., 1997, 1999). Abweichungen zwischen dem halbtägigen Gezeitenwind im Mesopausenbereich im COMMA-Modell in $52.5^\circ N$ bei Sommerbedingungen und den Langzeitwindmessungen von Collm wurden jedoch bereits auch in früheren Untersuchungen beobachtet (Lange et al. 1999).

Diskussion und Ausblick

Die Untersuchung des Einflusses von stratosphärischen stationären Wellen auf das Windfeld im Bereich der Mesopause in 90 km Höhe hat gezeigt, daß die Variationen, die in Langzeitmessungen entlang des Breitengürtels zwischen $52^\circ N$ und $56^\circ N$ im Winter beobachtet werden, durch die Simulationen in der Größenordnung richtig reproduziert werden. Darüber hinaus sind bei der halbtägigen Gezeitenamplitude auch quantitative Übereinstimmungen in der Phasenlage der Maxima und Minima entlang des Breitenkreises vorhanden. Zwar läßt sich aus den relativ wenigen Beobachtungen noch nicht eindeutig schließen, daß das Ausbreitungsverhalten der stationären Wellenstörung von der Strato-

sphäre in die Mesopausenregion in den Simulation richtig beschrieben wird, die Ergebnisse lassen jedoch den Schluß zu, daß die längenabhängigen Variationen im Winter wesentlich durch den Polarwirbel bedingt sind.

Eine weiterhin offene Frage bleibt, worauf die relativ großen Unterschiede der halbtägigen Gezeitenamplitude zwischen den nahe beieinander liegenden Stationen in Europa zurückzuführen sind. Abgesehen von der Meßungenauigkeit kommen die folgenden Ursachen in Betracht: Zum einen können längenabhängige Variationen der Schwerewellenaktivität durch Wechselwirkungsprozesse starken Einfluß auf die lokalen Eigenschaften der Gezeiten nehmen. Ein weiterer Punkt ist der Einfluß von längenabhängigen Ozonvariationen, die zu Variationen im Antrieb der solaren Gezeiten führen. Weiterhin ist das Ausbreitungsverhalten der stationären Wellen im kritischen Übergangsbereich zwischen Westwind- und Ostwindzonen in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre noch unklar, was für das Verständnis der Störung im Mesopausenbereich von Bedeutung ist. Hierzu sind weitere Modellstudien zum Ausbreitungsverhalten und dem Energietransport der Welle erforderlich. Aber auch weitere koordinierte Meßkampagnen zwischen den verschiedenen Stationen tragen zu einer höheren Verlässlichkeit der bisherigen Erkenntnisse bei.

Dank

Diese Untersuchung wurde von der Deutschen Forschungsgesellschaft (Aktenzeichen JA 836/3-2) unterstützt.

Literatur

- Bremer, J., R. Schminder, K.M. Greisiger, P. Hoffmann, D. Kürschner, and W. Singer, 1997: Solar cycle dependence and long-term trends in the wind field of the mesosphere and thermosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **59**, 497-509.
- Hagan, M. E., J. L., Chang, and S. K. Avery, 1997: GSWM estimates of non-migrating tidal effects. *J. Geophys. Res.* **102**, 16,439-16,452.
- Hagan, M. E., M. D. Burrage, J. M. Forbes, J. Hackney, W. J. Randel, and X. Zhang, 1999: GSWM-98: Results for migrating solar tides. *J. Geophys. Res.* **104**, 6813-6828.
- Jacobi, Ch., Yu.I. Portnyagin, T.V. Solovjova, P. Hoffmann, W. Singer, A.N. Fahrutdinova, R.A. Ishmuratov, A.G. Beard, N.J. Mitchell, H.G. Muller, R. Schminder, D. Kürschner, A.H. Manson, and C.E. Meek, 1999: Climatology of the semidiurnal tide at 52 – 56°N from ground-based radar wind measurements 1985-1995. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **61**, 975-991.
- Jacobi, Ch., 2000: Midlatitude Mesopause Region Dynamics and its Coupling with Lower and Middle Atmospheric Processes, *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig und dem Institut für Troposphärenforschung e. V. Leipzig*, Bd. **20**, 132 pp.
- Lange, M., R. Schminder, Ch. Jacobi, F., Baier, and G. Günther, 1999: Simulation of middle atmosphere winds and comparison with mesopause region wind measurements. *Adv. Space Res.* **24**, 1527-1530.
- Manson, A., Ch. Meek, M. Hagan, Ch. Hall, W. Hocking, J. MacDougall, S. Franke, D. Riggins, D. Fritts, R. Vincent, and M. Burrage, 1999: Seasonal variations of the

semi-diurnal and diurnal tides in the MLT: multi-year MF radar observations from 2 to 70°N, and the GSWM tidal model. *J. Atmos. Terr. Phys.* **61**, 809-828.

Shepherd, G. 1996: Planetary scale mesopause observing system. Project Description, 1996, 13 pp.

Anschrift des Verfassers:

Martin Lange, Institut für Meteorologie, Stephanstr. 3, 04103 Leipzig.
Email: mlange@uni-leipzig.de